

УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАССОПЕРЕНОСА И ПУЧЕНИЯ ПРИ ПРОМЕРЗАНИИ ГРУНТОВ

К. А. Агутин, Г. П. Бровка, И. В. Дедюля

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. В данной работе описаны методы экспериментальных исследований характеристик морозного пучения грунтов в соответствии с разработанными математическими моделями авторов. На предварительной стадии исследования на образцах сравнительно малого размера в закрытой системе влагообмена предлагается оперативно определять влияние температурного режима, влажности, плотности и наличия в поровом растворе солей на основную характеристику переноса влаги при промерзании грунтов – коэффициент термовлагопроводности мерзлой зоны K_m . Использование этого коэффициента, численно равного потоку влаги из талой зоны в мерзлую при единичном градиенте температуры, позволяет с учетом динамики температурного поля в промерзающем грунте рассчитать перераспределение влаги и величину морозного пучения.

Следующая стадия исследований проводится на установке с открытой системой влагообмена на цилиндрических образцах, диаметр которых составляет 100 мм. Указанное соотношение размеров при хорошей боковой теплоизоляции обеспечивает их одномерное промерзание. Созданная установка позволяет реализовать различные варианты исследований характеристик массопереноса и морозного пучения, а также максимального давления пучения в зависимости от температуры на охлаждаемой поверхности и условий подпитки образца влагой или раствором соли.

Ключевые слова: морозное пучение; миграция влаги; грунты; характеристики влагопереноса; методы исследования.

Для цитирования. Агутин К. А. Бровка Г. П., Дедюля И. В. Установки и методики исследования характеристик массопереноса и пучения при промерзании грунтов // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 148–158.

INSTALLATIONS AND METHODS FOR STUDYING OF MASS TRANSFER AND SWELLING CHARACTERISTICS DURING SOILS FREEZING

К. А. Agutin, Г. П. Brovka, I. V. Dedyulya

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The article describes the methods of the experimental studies of the characteristics of soil freezing in accordance with the developed mathematical models of the authors. At the preliminary stage of research on the samples of relatively small size in a closed moisture-exchange system it is proposed to determine the influence of temperature regime, humidity, density and the presence of salts in pore solution on the main characteristic of moisture transfer during soil freezing – the coefficient of the thermal moisture conductivity of the frozen zone K_m . The use of this coefficient, which is numerically equal to the moisture flux from the thawed zone to the frozen zone at a single temperature gradient, makes it possible to calculate moisture redistribution and frost heave in regard to the dynamics of the temperature field in the freezing ground.

The next stage of research is carried out at an installation with the open system of moisture exchange on cylindrical samples with the diameter and height of 100 mm. The specified ratio of dimensions with good lateral thermal insulation ensures their one-dimensional freezing. The created installation allows to realize different variants of the research of mass transfer and frost heaving characteristics, as well as maximum frost heaving pressure depending on the temperature on the cooled surface and conditions of the sample feeding with moisture or salt solution.

Keywords: frost heaving; moisture migration; soils; moisture transfer characteristics; research methods.

For citation. Agutin K. A., Brovka G. P., Dedyulya I. V. Installations and methods for studying of mass transfer and swelling characteristics during soil freezing. *Nature Management*, 2025, no. 1, p. 148–158.

Введение. В ранее опубликованных работах авторов указывалось, что в настоящее время при проведении инженерных изысканий объектов, подвергающихся морозному пучению, согласно нормативным техническим документам, используется подход, основанный на сравнительной оценке параметров морозного пучения. Такой подход не позволяет учитывать различные начальные и граничные условия при расчетах морозного пучения. Поэтому часто фактическая величина морозного пучения

грунтов и горных пород может быть как больше, так и меньше величины, оцениваемой по стандартным методам испытания.

Сравнительный подход или метод аналогии при инженерных испытаниях позволяет дать в основном качественную характеристику склонности исследуемых образцов к морозному пучению. В связи с этим необходимо развивать методологию таких научных исследований, которая, с одной стороны, должна выявлять основные механизмы массопереноса и деформации при промерзании, а с другой – уточнять согласованные математические модели и экспериментальные методы в соответствии с феноменологическим подходом, характерным для теории тепло- и массопереноса. Следует отметить, что в этом направлении, несмотря на значительный объем публикаций [1–10], остаются еще дискуссионные вопросы, что не позволяет в полном объеме стандартизовать методы оценки морозного пучения.

В рамках указанных проблем в данной работе предлагаются методы экспериментальных исследований характеристик морозного пучения грунтов в соответствии с разработанными подходами и математическими моделями авторов [11–14].

Установка и методика исследования характеристик массопереноса при промерзании в условиях закрытой системы влагообмена. Для оперативного определения характеристик морозного пучения на предварительном этапе исследований предлагается использовать модернизированную установку, которая использовалась ранее при изучении миграции влаги при промерзании грунтов [13] (рис. 1). Установка позволяет создавать неоднородное температурное поле в тонком 10-миллиметровом слое исследуемого грунта. Она состоит из массивной плиты 1 толщиной 10 мм, плотно зажатой по торцевым поверхностям между двумя теплообменниками, расположенными на расстоянии 200 мм друг от друга. Через левый теплообменник прокачивается антифриз от криостата 14 с температурой $t_1 < 0^\circ\text{C}$, с правой стороны расположен нагревательный элемент 2 для создания необходимого в опыте температурного поля. Таким образом в плите создается температурное поле, необходимое в проводимом опыте. Оуществленная модернизация позволила не только устанавливать в пластине контролируемое распределение температуры, но и задавать необходимую динамику температурного поля с продвижением границы талой и мерзлой зон.

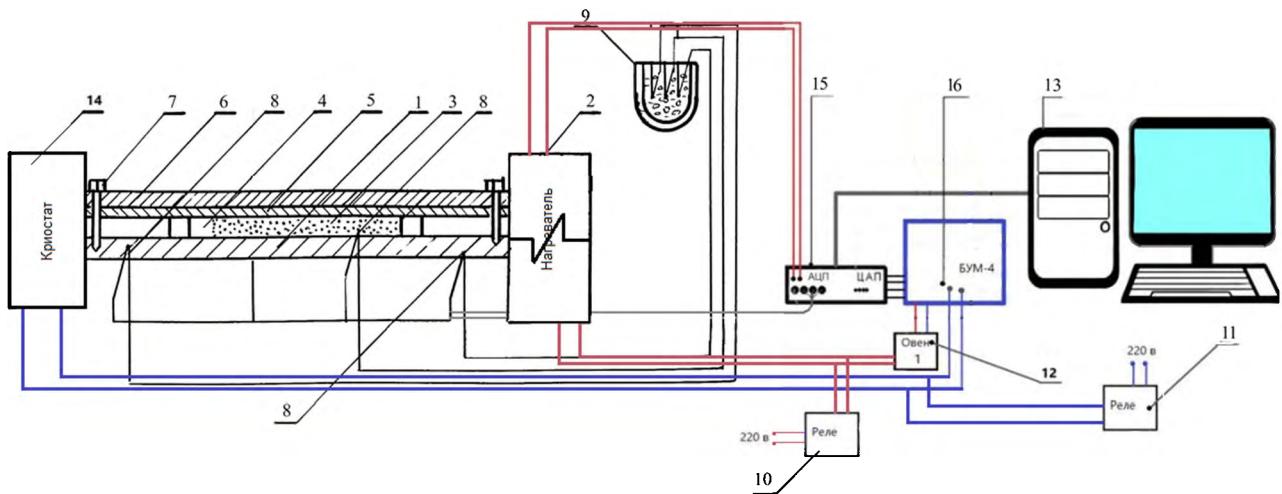


Рис. 1. Схема установки для исследования миграции влаги в стационарном температурном поле:
 1 – массивная стальная плита; 2 – нагреватель; 3 – образцы исследуемого материала;
 4 – полость для распутчивания в кассете; 5 – металлическая пластина; 6 – текстолитовая пластина;
 7 – прижимные винты; 8 – термопары; 9 – ноль-термостат; 10 – реле включения нагревателя;
 11 – реле включения компрессора холодильной камеры; 12 – измеритель-регулятор температуры Овен-1;
 13 – персональный компьютер; 14 – криостат; 15 – четырехканальный компьютерный порт с АЦП и ЦАП;
 16 – четырехканальный усилитель мощности БУМ-4

Fig. 1. Scheme of the installation for the study of moisture migration in a stationary temperature field:
 1 – massive steel plate; 2 – heater; 3 – samples of the material under study; 4 – cavity for rasping in the cassette;
 5 – metal plate, 6 – textolite plate; 7 – clamping screws; 8 – thermocouples; 9 – zero-thermostat;
 10 – heater switch-on relay; 11 – refrigerating chamber compressor switch-on relay;
 12 – temperature regulator Oven-1; 13 – personal computer; 14 – cryostat;
 15 – four-channel computer port with analog-to-digital converter (АЦП) and digital to analog converter(ЦАП);
 16 – four-channel power amplifier (power amplification block) БУМ-4

Исследуемый грунт помещали в специальную кассету, которая представляет собой рамку из оргстекла с приклеенным полимерным днищем. На рис. 2 указаны размеры кассеты, выраженные в миллиметрах. Заполненную кассету сверху закрывали полимерной прозрачной пленкой и укладывали на плиту. Размеры установки позволяют одновременно укладывать пять заполненных кассет. Каждую из заполненных кассет уже непосредственно на плите покрывали тонкой прозрачной пластиной (по размеру кассеты), затем – металлической 5 10-миллиметровой толщины и эбонитовой 6 пластинами. С помощью четырех болтов 7 кассеты прижимали к плите, чем обеспечивали тепловой контакт и задаваемое в опыте температурное поле. Использование прозрачных материалов позволяет визуально наблюдать картину изменения структуры промороженных образцов перед выемкой их из установки.

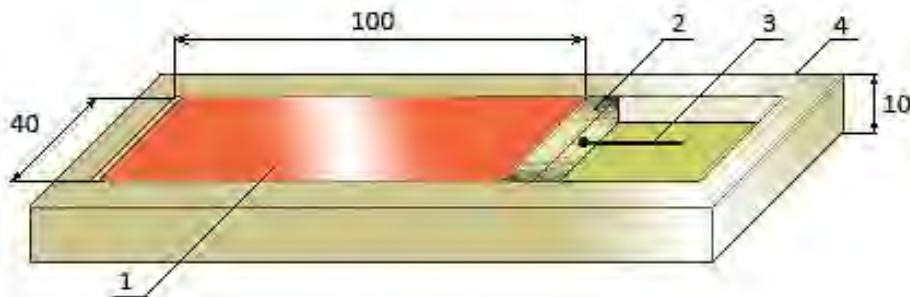


Рис. 2. Кассета для исследования криогенного массопереноса и пучения грунтов и горных пород:
1 – исследуемый материал; 2 – перегородка из пенопласта;
3 – инициатор кристаллизации; 4 – корпус кассеты из оргстекла

Fig. 2. Cassette for the study of cryogenic mass transfer and swelling of soils and rocks:
1 – material under study; 2 – partition made of foam plastic;
3 – crystallization initiator; 4 – plexiglass cassette body

Контроль за температурным режимом установки осуществляли с помощью медно-константановых термопар, измерительные спаи которых размещены на крайних точках стальной плиты. Для модернизации установки использовали компьютерную систему, включающую четырехканальный предусилитель 16, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), выполненные в виде модуля В-381 15, соединенного с ПК 13 через принтерный порт, а также двух промежуточных реле 10 и 11, непосредственно регулирующих режим работы нагревательного элемента и криостата. Задание и контроль режимов проведения опытов проводили с помощью специально разработанной компьютерной программы. Окно основного интерфейса этой программы представлено на рис. 3.

Модернизированная установка позволяет в строго контролируемых температурных режимах проводить опыты по исследованию миграции влаги и солей в мерзлых грунтах и горных породах под воздействием градиента температуры в статическом и динамическом температурных режимах. В статическом температурном режиме поддерживается стационарное температурное поле, включающее зоны с отрицательной и положительной температурой с заданным градиентом температуры по длине образца. В динамическом температурном режиме при заданном градиенте температуры зон их граница продвигается с постоянной скоростью.

Опыты проводили по следующей методике. Кассеты равномерно заполняли исследуемым материалом. В правой части кассеты оставляли свободное пространство 4, куда образец может распучиваться. Заполненные кассеты влагоизолировали и выдерживали в изотермических условиях не менее 2 сут. Перед началом опыта в каждую кассету вставляли инициатор кристаллизации 3 (рис. 2) в виде тонкой полимерной трубки, заполненной увлажненным пористым материалом. Размещение кассет на плите установки осуществляли после достижения заданного температурного режима.

В статическом режиме на терmostатируемой плите температуру изменяли от -12°C до $+8^{\circ}\text{C}$ с границей мерзлой и талой зон, сдвинутой от центра на 2–4 см в сторону холодной температуры с таким расчетом, чтобы величина мерзлой зоны составляла 40–60 мм. В динамическом температурном режиме начальное распределение температуры изменяли от -7°C до $+13^{\circ}\text{C}$. Затем в процессе опыта температуру на холодной стороне в течение суток равномерно понижали по заданной программе до -12°C . На теплой стороне температуру также автоматически синхронно понижали до $+8^{\circ}\text{C}$, обеспечивая постоянный градиент температуры порядка $1^{\circ}\text{C}/\text{см}$. Длительность процесса промораживания образцов в статическом и динамическом режимах составила около 24 ч.

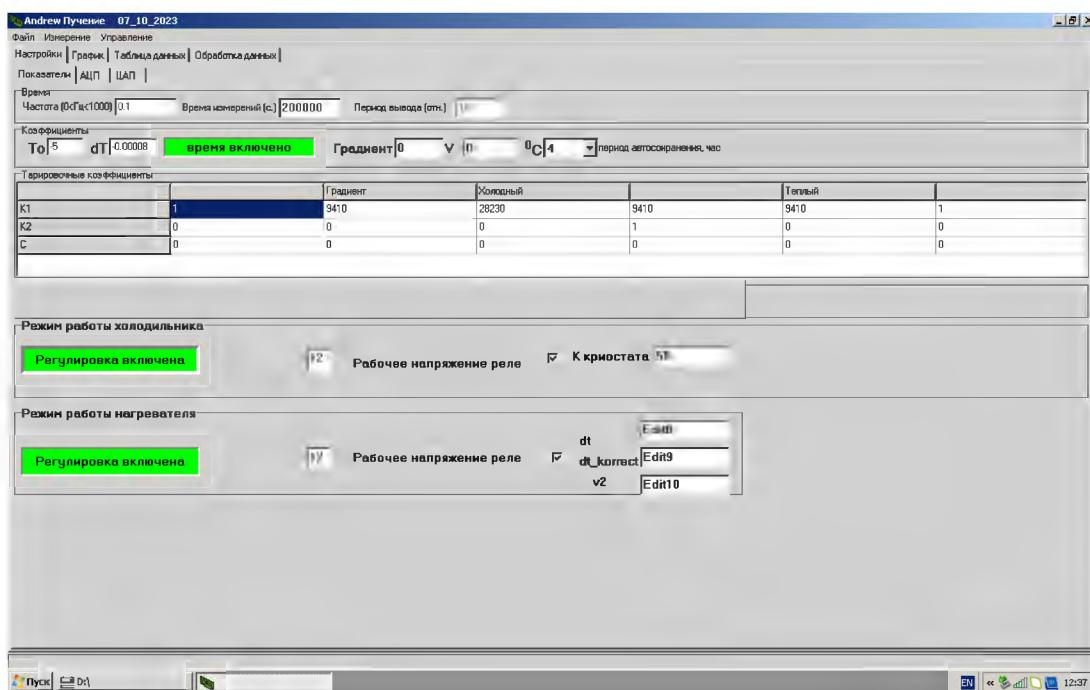


Рис. 3. Окно основного интерфейса программы для автоматизации и контролирования температурного режима установки для исследования криогенной миграции влаги и солей

Fig. 3. Window of the main interface of the program for automation and controlling temperature regime of the installation for the study of cryogenic migration of moisture and salts

После выдерживания кассет с образцами в течение указанного интервала времени в заданном температурном режиме образцы извлекали и разрезали на 10-миллиметровые зоны с последующим определением влагосодержания в каждой из них. На рис. 4 и 5 представлены графики типичного перераспределения влаги в образцах глинистых пород в статическом и динамическом режимах.

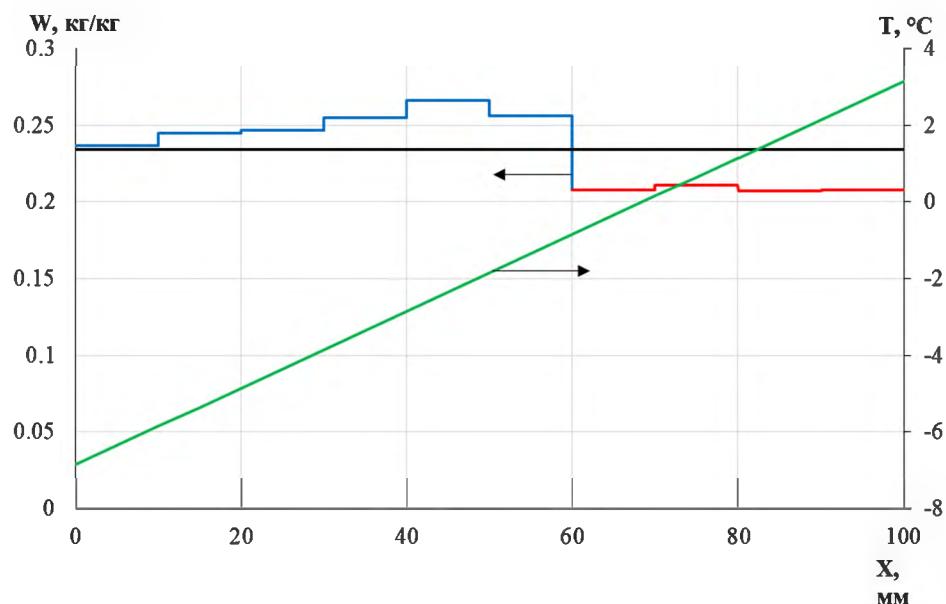
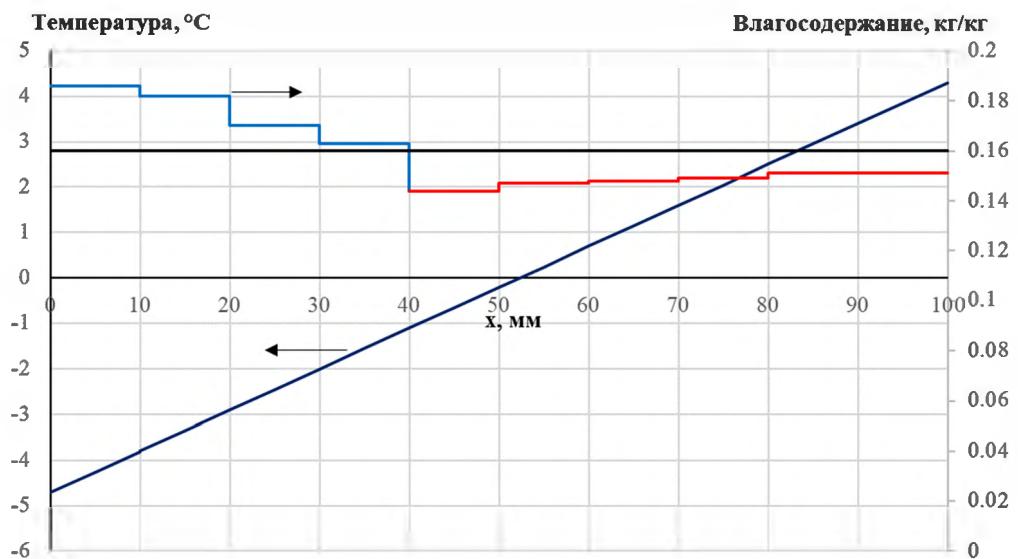


Рис. 4. Типичное перераспределение влаги в образце глины ($W_0 = 0,233$, $T_{нз} = -0,85$ °C, влагосодержание – 0,233 кг/кг, режим – статический)

Fig. 4. Typical moisture redistribution in a clay sample ($W_0 = 0.233$, $T_{нз} = -0.85$ °C, moisture content – 0.233 kg/kg, static mode)



**Рис. 5. Типичное перераспределение влаги в образце
(смесь глина – песок, $T_{нз} = -1$ °С, влагосодержание – 0,160 кг/кг, режим – динамический)**

**Fig. 5. Typical moisture redistribution in the sample
(clay – sand mixture, $T_{нз} = -1$ °C, moisture content – 0.160 kg/kg, dynamic mode)**

При наличии в поровом растворе образов соли кроме распределения влаги определяли и распределение соли.

Методика определения распределения соли в образцах грунтов после промораживания.

По окончании процесса промораживания образцов кассеты по очереди извлекали из установки. Сразу определяли глубину промерзания материала в кассете. Для определения распределения влаги и соли по длине образца его разделяли на 10-миллиметровые зоны, каждую из которых помещали в отдельный бюкс. После сушки и определения влагосодержания образец каждой зоны непосредственно в бюксе заливали дистиллированной водой в соотношении по массе 1 : 1 и герметично укупоривали. В таком состоянии образцы хранили 2 сут. По истечении этого срока бюксы открывали, затем их содержимое тщательно перемешивали до состояния суспензии.

Концентрацию соли в поровой влаге определяли методом контактной кондуктометрии. Для этого использовали кондуктометрическую ячейку, представляющую собой выфрезерованную в плексигласе ванночку (10 мм × 10 мм × 35 мм), в торцах которой размещены плоские (10 мм × 10 мм) титановые электроды (рис. 6).



Рис. 6. Кондуктометрическая ячейка

Fig. 6. Conductometric cell

Ванночку до краев заполняли суспензией исследуемого грунта. С помощью моста переменного тока Р577 определяли электрическое сопротивление помещенного в ванночку материала. Проводимость суспензии прямо пропорциональна концентрации соли, поэтому сначала по формуле $\sigma = 1 / R$ (σ – электрическая проводимость, R – измеренное сопротивление материала) рассчитывали проводимость суспензии, далее строили график распределения проводимости по длине исследуемого материала, а затем – график зависимости распределения соли.

Для получения зависимости распределения соли по длине образца использовали тарировочные графики, которые строили следующим образом. Дополнительно для каждого исследуемого вида образцов изготавливали по несколько проб с различным содержанием соли NaCl. В дальнейшем эти пробы промораживали, высушивали и увлажняли по аналогичной с исследуемыми образцами методике. После этого определяли их электропроводность и строили график зависимости $R = R(c)$, где c – концентрация соли.

Методика расчета характеристик влагопереноса при промерзании в условиях закрытой системы. На основании полученных экспериментальных данных по распределению влаги в образцах горных пород при их промораживании в условиях закрытой системы влагообмена проводили расчет характеристик влагопереноса.

Расчет плотности потока для статического промораживания:

$$q_{ct} = \frac{\rho_{ck} \Delta W_{mc} h_m}{\Delta t}, \quad (1)$$

где ρ_{ck} – плотность скелета, кг/м³; ΔW_{mc} – среднее увеличение влагосодержания мерзлой зоны по сравнению с исходным влагосодержанием, кг/кг; h_m – величина мерзлой зоны, м; Δt – время промораживания, с (~86 000 с).

Расчет плотности потока для динамического промораживания при низкой влагопроницаемости мерзлой зоны и локализации льдовыделения вблизи фронта промерзания:

$$q_d = \Delta W_{mt} \rho_{ck} V, \quad (2)$$

где ΔW_{mt} – разность влагосодержания на границе мерзлой и талой зон, кг/кг; V – скорость продвижения границы промерзания, м/с (~6·10⁻⁷ м/с).

Для засоленных пород с существенной влагопроницаемостью мерзлой зоны, а также незасоленных пород с выявленной заметной влагопроницаемостью можно использовать модифицированную формулу (3), где вместо ΔW_{mt} – разность влагосодержания на границе мерзлой и талой зон используется ΔW_{mc} – среднее увеличение влагосодержания мерзлой зоны по сравнению с исходным влагосодержанием.

$$q_d = \Delta W_{mc} \rho_{ck} V. \quad (3)$$

Расчет коэффициента термовлагопроводности мерзлой зоны:

$$K_m = -\frac{q_{ct(d)}}{\text{grad } T}, \quad (4)$$

где $q_{ct(d)}$ – плотность потока для статического либо динамического промораживания; grad T – градиент температуры, °С/м.

Расчет коэффициента пучения за счет миграции влаги из талой зоны в мерзлую:

$$K_{pm} = \frac{\Delta W_{mc} \rho_{ck}}{\rho_l}, \quad (5)$$

где ρ_l – плотность льда, кг/м³ (916 кг/м³).

Для образцов грунтов с коэффициентом водонасыщения близким к 1 дополнительно учитывали пучение за счет изменения объема влаги, перешедшей в лед. В таком случае коэффициент пучения

$$K_p = \frac{\Delta W_{mc} \rho_{ck}}{\rho_l} + 1,09 (W_0 - W_h) \rho_{ck}, \quad (6)$$

где W_0 – исходная влажность; W_h – количество незамерзшей воды при температуре –10 °С.

Установка для исследования процессов морозного пучения грунтов в условиях открытой системы влагообмена. Для исследования процессов пучения дисперсных грунтов в открытой системе использовали оригинальную лабораторную установку, разработанную по базовой программе научных исследований лаборатории физико-химической механики Института природопользования НАН Беларусь. Данная установка позволяет отслеживать динамику морозного пучения в режиме реального времени в зависимости от заданных условий эксперимента и физико-химических свойств опытного образца грунта. Вся установка состоит (рис. 7) из цилиндрического корпуса 1, смонтированного на прочном теплоизолирующем основании 2, выполненном из эбонита.

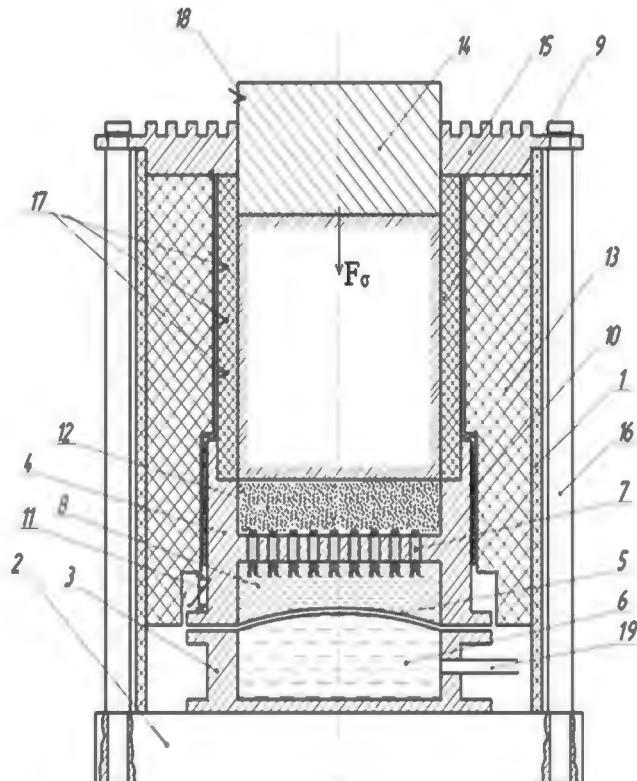


Рис. 7. Установка для исследования процессов пучения дисперсных грунтов
1 – цилиндрический корпус из полиэтиленовой трубы; 2 – основание;

3 – нижняя часть корпуса дренажной системы; 4 – верхняя часть корпуса дренажной системы; 5 – резиновая мембрана; 6 – силиконовое масло; 7 – волокнистый материал; 8 – вода (раствор); 9 – кассета с исследуемым грунтом; 10 – нагревательный элемент; 11 – датчик температуры; 12 – дисперсный материал; 13 – теплоизоляционный кожух; 14 – штамп; 15 – теплообменник; 16 – металлические стойки; 17 – термопары для контроля распределения температуры в образце; 18 – термопара контроля температуры в штампе; 19 – трубка для соединения с мерной бюреткой

Fig. 7. Installation for research of dispersed soil swelling processes:

1 – cylindrical body made of polyethylene pipe; 2 – base; 3 – lower part of the drainage system body; 4 – upper part of the drainage system body; 5 – rubber membrane; 6 – silicone oil; 7 – fiber material; 8 – water (solution); 9 – cassette with the studied soil; 10 – heating element; 11 – temperature sensor; 12 – disperse material; 13 – heat-insulating casing; 14 – die; 15 – heat exchanger; 16 – metal posts; 17 – thermocouples for control of temperature distribution in the sample; 18 – thermocouple for temperature control in the die; 19 – tube for connection with measuring burette

Установка оснащена дренажной системой, рабочая камера которой изготовлена из нержавеющей стали и состоит из двух камер: нижней 3 и верхней 4, разделенных между собой эластичной мембраной 5. Нижняя камера заполнена силиконовым маслом 6. Верхняя камера состоит из двух отсеков, разделенных между собой перегородкой. В перегородке просверлено свыше 100 отверстий диаметром 3,5 мм. В эти отверстия очень плотно затянут волокнистый материал 7, через который из нижнего отсека, заполненного либо дистиллированной водой 8, либо раствором, влага поступает в верхний отсек. Над верхним отсеком устанавливают капролоновую кассету с исследуемым грунтом 9. На внешней поверхности верхнего отсека размещают нагревательный элемент 10 и датчик температуры 11

системы терmostатирования подпитывающей жидкости, которые с помощью измерителя-регулятора обеспечивают поддерживание заданной положительной температуры нижней части образца и подпитывающей жидкости. Пространство между кассетой и волокнистым материалом перед установкой кассеты заполняют дисперсным материалом 12, который хорошо фильтрует воду и может доставлять ее к исследуемому грунту. Указанный материал подбирают индивидуально для каждого исследуемого грунта. В некоторых случаях это может быть тот же исследуемый грунт. В нижнюю половину по специальной гибкой трубке силиконовое масло подают из бюретки, позволяющей контролировать расход масла и соответственно количество воды, использованной на подпитку образца. Варьируя разность высот между уровнем масла в бюретке и уровнем воды в верхней половине дренажной системы можно задавать требуемый в данном опыте режим подпитки влагой промораживаемого грунта.

В пространстве между корпусом установки и кассетой с дренажной системой расположен теплоизоляционный кожух 13 из пенополимера, коэффициент теплопроводности которого составляет $0,03 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{К}$. После установки кассеты, убедившись, что между исследуемым грунтом и материалом из системы подпитки существует контакт, в кассету вставляют металлический штамп 14, который позволяет изменять внешнюю нагрузку на исследуемый образец. Завершают сборку установкой алюминиевого теплообменника 15. С целью обеспечения хорошего теплового контакта соприкасающихся поверхностей штампа и теплообменника между ними закладывают теплопроводящую смазку.

С помощью теплообменника и четырех металлических стоек 16 корпус установки прочно соединяют с основанием.

Распределение температуры по высоте образца в процессе промораживания контролируют три термопары 17, рабочие спаи которых заглублены в кассету на разной высоте. Отдельная термопара контролирует температуру штампа 18. Регистрацию температуры осуществляют с помощью компьютерной системы, описанной выше.

Кассета имеет высоту 115 мм. Она изготовлена таким образом, что диаметр ее верхней части несколько больше диаметра основания. Грунтом кассету заполняют таким образом, что в верхней ее части остается незаполненная зона высотой около 15 мм. Это позволяет грунту распучиваться в процессе промерзания в свободную зону, поднимая штамп вверх. При необходимости высоту кассеты, полиэтиленового корпуса установки и теплоизоляционного кожуха можно увеличивать за счет соответствующих вставок на высоту 50 мм.

С помощью разработанной установки можно проводить различные варианты исследования характеристик массопереноса и пучения при промерзании грунтов. Первым вариантом является промораживание, соответствующее условиям полуограниченной среды, т. е. температурное изменение не должно достигать нижней границы положительной области и распределение температуры носит автомодельный характер, позволяющий распределение температуры выражать от обобщенного пространственно-временного параметра $\xi = xt^{-0.5}$. Для этого образец промораживают на глубину не более половины его начального размера. Типичные картины распределения влажности и формулы для расчета коэффициента термовлагопроводности мерзлой зоны K_m и коэффициента диффузии талой зоны a_w представлены ниже – на рис. 8 и в формулах (7), (8).

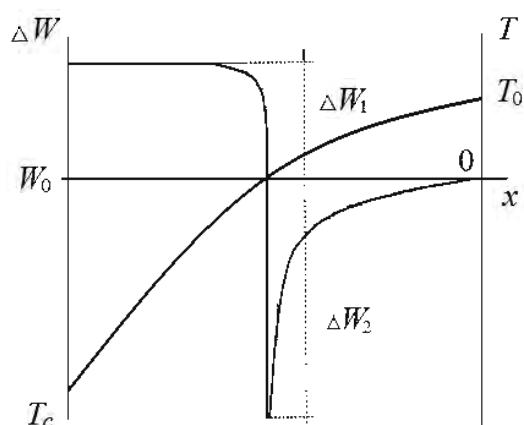


Рис. 8. Типичное распределение влагосодержания при промерзании грунта в форме полуограниченной среды с постоянной температурой на поверхности (автомодельная задача)

Fig. 8. Typical distribution of moisture content at freezing of the ground in the form of a semi-confined medium with constant surface temperature (auto-model task)

$$K_M = \frac{1}{2} \left(W|_{x=\xi-0} - W|_{x=\xi+0} \right) \rho_{ck} \frac{\xi}{\tau}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial W}{\partial x}|_{x=\xi+0}$$

$$a_W = \frac{-\frac{1}{2} \left(W|_{x=\xi-0} - W|_{x=\xi+0} \right) \rho_{ck} \frac{\xi}{\tau}}{\frac{\partial W}{\partial x}|_{x=\xi+0}}, \quad (8)$$

где $W|_{x=\xi-0}$ – влагосодержание в мерзлой зоне на фронте промерзания; $W|_{x=\xi+0}$ – влагосодержание в талой зоне на фронте промерзания; ξ – величина промерзшей зоны; τ – время промерзания.

Во втором варианте на установке можно проводить опыты по определению интенсивности морозного пучения при различных условиях подпитки влагой талой зоны и величины нагрузки на грунт. Для этого после размещения установки на рабочем столе «АСИС» образец выдерживали в камере в течение суток при температуре на 2–3 °C выше температуры начала замерзания воды в образце. При этом уровень масла в мерной бюретке устанавливали в пределах на 0,2–0,5 м ниже корпуса дренажной системы. В отдельных опытах уровень масла в мерной бюретке может соответствовать корпусу дренажной системы или быть несколько выше его. Таким образом имитировали условия подпитки исследуемого образца влагой. Нагрузка верхней части образца в этой стадии должна составлять 0,1–0,2 кг/см², что соответствует давлению слоя грунта в 1–2 м.

После этого камеру переводили в режим замораживания и вели наблюдение за температурой в точках расположения датчиков, расходу жидкости в системе подпитки и положению верхней части штампа. При этом значения температуры в камере и в системе подпитки подбирали таким образом, чтобы с учетом температуры начала замерзания воды в образце и коэффициентов теплопроводности мерзлой и талой частей образца фронт промерзания образца был стабилизирован на расстоянии 4–5 см от нижней кромки штампа. Температура в камере в основном составляла на 4–5 °C ниже температуры начала замерзания в образце, а градиент температуры в мерзлой части образца – порядка 1 °C/см. В установившемся режиме первая стадия опыта длилась в течение 1–2 сут.

В заключительной стадии опыта с помощью испытательного комплекса «АСИС» на штамп воздействовали последовательно возрастающей через 2–3 ч нагрузкой до прекращения деформации морозного пучения. Эту нагрузку фиксировали как максимальное давление морозного пучения при заданных условиях температурного режима и подпитки образца влагой. После фиксации максимальной нагрузки опыт прекращали, образец изымали из установки и разрезали на 5–10-миллиметровые зоны для последующего анализа на распределение влаги.

В третьем варианте опыты проводили по методике, максимально соответствующей ГОСТ 28622-2012. На предварительной стадии отработки методики исследования проводили сравнения расчетными методами динамики температурного поля при высоте образца 100 и 150 мм. В результате установлено, что при высоте образца 150 мм проявляются факторы влияния бокового теплообмена на скорость промерзания образцов вплоть до остановки продвижения фронта промерзания на глубине 50–70 мм. Особенно явно это проявляется для образцов глины при влажности менее 0,21 кг/кг, когда различие коэффициентов теплопроводности мерзлых и талых образцов составляет не более 20 %. Фактическое промерзание глинистых пород при аналогичных исходных параметрах подтвердили расчетные данные. Для устранения влияния бокового теплообмена при высоте образцов 150 мм необходимо создавать дополнительные охранные тепловые экраны и более эффективные теплоизоляционные кожухи. Также методами численного моделирования установлено, что при высоте образца в 100 мм и промораживании его до 2/3 (67 мм) в 2 раза уменьшается время промораживания при сохранении относительной величины пучения и увеличения влажности мерзлой зоны. Это соответствует теории подобия процессов тепло- и массопереноса. Таким образом, для выполнения научных исследований в области оценки пучинистых свойств грунтов можно рекомендовать проводить опыты при высоте образцов в 100 мм, соблюдая относительную величину промерзания, рекомендуемую ГОСТ 28622-2012. В области изысканий под строительство конкретных объектов необходимо эти вопросы согласовывать с заказчиком.

С учетом приведенных аргументов и анализа предлагается следующая методика, учитывающая основные принципы ГОСТ 28622-2012. После размещения установки на рабочем столе «АСИС» к образцу прикладывают нагрузку, соответствующую величине эффективного давления на горизонте от-

бора кернового материала, равную разности бытового давления и гидростатического давления выше лежащего слоя воды на данном горизонте. В таком состоянии образец выдерживают в климатической камере в течение суток при температуре на 1 °C выше температуры начала замерзания воды в образце. При этом уровень масла в мерной бюретке устанавливают в пределах на 0,2–0,5 м ниже корпуса дренажной системы. Затем камеру переводится в режим замораживания и ведут наблюдение за температурой в точках расположения датчиков, расходом жидкости в системе подпитки и положением верхней части штампа. Значения температуры в камере и в системе подпитки подбирают таким образом, чтобы обеспечить температуру на штампе и в нижней части образца $-4 \pm 0,2$ °C на штампе и $+2 \pm 0,2$ °C в нижней части образца. В установившемся режиме опыт продолжают в течение 1–2 сут до промораживания образца на глубину 66–68 мм. После окончания опыта образец извлекают из обоймы, измеряют фактическую толщину мерзлой зоны и разрезают на 10-миллиметровые слои для определения их влажности.

Заключение. Предложенная методика определения характеристик массопереноса и морозного пучения грунтов на предварительной стадии исследования позволяет на образцах сравнительно малого размера в закрытой системе влагообмена оперативно определить влияние температурного режима, влажности, плотности и наличия в поровом растворе солей на основную характеристику переноса влаги при промерзании грунтов – коэффициент термовлагопроводности мерзлой зоны K_m . Используя эту характеристику, которая численно равна потоку влаги из талой зоны в мерзлую при единичном градиенте температуры, и динамику температурного поля в промерзающем грунте, можно рассчитать перераспределение влаги и величину морозного пучения.

Следующую стадию исследования рекомендуется проводить на установке с открытой системой влагообмена с достаточно представительными цилиндрическими образцами, диаметр и высота которых составляет 100–150 мм. Указанное соотношение размеров при хорошей боковой теплоизоляции обеспечивает одномерное промерзание образцов. На указанной установке можно реализовать три варианта исследований характеристик массопереноса и морозного пучения, а также максимального давления пучения в зависимости от температуры на охлаждаемой поверхности и условий подпитки образца влагой или раствором соли.

Разработанные методики определения характеристик массопереноса и морозного пучения грунтов в настоящее время используются в лаборатории физико-химической механики природных дисперсных систем Института природопользования НАН Беларуси для выполнения исследований по государственной программе научных исследований, по научному обеспечению подпрограммы «Развитие деятельности Белорусской антарктической станции» и договорным работам с проектными организациями Российской Федерации.

Список использованных источников

1. Вторина, Е. А. Льдообразование в горных породах / Е. А. Вторина, Б. И. Вторин. – М. : Наука, 1970. – 279 с.
2. Гречищев, С. Е. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз / С. Е. Гречищев, Л. В. Чистотинов, Ю. Л. Шур. – М. : Недра, 1980. – 382 с.
3. Дерягин, Б. В. Термокристаллизационный перенос влаги в промерзающих пористых телах / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев // Тепломассообмен. – 1980. – Т. 7. – С. 3–10.
4. Дерягин, Б. В. Течение незамерзающих прослоек воды и морозное разрушение пористых тел / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев // Коллоидный журнал. – 1980. – Т. 42, № 5. – С. 842–852.
5. Ершов, Э. Д. Экспериментальное исследование влагопереноса в грунтах при их промерзании в условиях «открытой» и «закрытой» системы / Э. Д. Ершов, В. Г. Чеверев, Ю. П. Лебеденко // Мерзлотные исследования. – М. : Изд-во Москов. ун-та, 1978. – Вып. 17. – С. 197–206.
6. Комаров, И. А. Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах / И. А. Комаров. – М. : Научный мир, 2003. – 608 с.
7. Кудрявцев, С. А. Численное моделирование процесса промерзания, морозного пучения и оттаивания грунтов / С. А. Кудрявцев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2004. – № 5. – С. 21–26.
8. Орлов, В. О. Морозное пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений / В. О. Орлов, Ю. Д. Дубнов, Н. Д. Меренков. – Л. : Стройиздат, Ленинград. отд., 1977. – 183 с.
9. Пермяков, П. П. Идентификация параметров математической модели тепловлагопереноса в мерзлых грунтах / П. П. Пермяков. – Новосибирск : Наука, 1989. – 84 с.
10. Чеверев, В. Г. Природа криогенных свойств грунтов / В. Г. Чеверев. – М. : Научный мир, 2004. – 234 с.
11. Бровка, Г. П. Математические модели и методы экспериментального исследования процессов тепломассопереноса и пучения при промерзании грунтов / Г. П. Бровка, К. А. Агутин, А. А. Мурашко // Инженерная геология. – 2021. – Т. XVI, № 4. – С. 62–71.
12. Бровка, Г. П. Тепло- и массоперенос в природных дисперсных системах при промерзании / Г. П. Бровка. – Минск : Навука і тэхніка, 1991. – 189 с.
13. Бровка, Г. П. Взаимосвязанные процессы тепло- и массопереноса в природных дисперсных средах / Г. П. Бровка. – Минск : Беларус. наука, 2011. – 362 с.

14. Бровка, Г. П. Методологические вопросы исследования и прогнозирования морозного пучения грунтов / Г. П. Бровка, И. В. Дедюля, К. А. Агутин // Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения : материалы науч.-практ. конф., г. Москва, 13–14 апр. 2017 г. – М., 2017. – С. 178–185.

References

1. Vtyurina E. A., Vtyurin B. I. *L'doobrazovanie v gornyh porodah* [Ice formation in rocks]. Moscow, Nauka Publ., 1970, 279 p. (in Russian)
2. Grechischev S. E., Chistotinov L. V., Shur Y. L. *Kriogennye fiziko-geologicheskie processy i ih prognoz* [Cryogenic physical and geological processes and their forecast]. Moscow, Nedra Publ., 1980, 382 p. (in Russian)
3. Deryagin B. V., Churayev H. V. *Termokristallizacionnyj perenos vлагi v promerzayushchih poristyh telah* [Thermo-crystallization moisture transfer in freezing porous bodies]. *Teplo- i massoobmen = Heat and Mass Transfer*, 1980, vol. 7, pp. 3–10. (in Russian)
4. Deryagin B. V., Churayev N. V. *Techenie nezamerzayushchih prosloek vody i moroznoe razrushenie poristyh tel* [Flow of non-freezing water layers and frost damage of porous bodies]. *Kolloidnyj zhurnal = Colloid Journal*, 1980, vol. 42, no. 5, pp. 842–852. (in Russian)
5. Ershov E. D., Cheverev V. G., Lebedenko Y. P. *Eksperimental'noe issledovanie vlagoperenosa v gruntah pri ih promerzaniyu v usloviyah "otkrytoj" i "zakrytoj" sistemy* [Experimental study of moisture transfer in soils during their freezing under conditions of "open" and "closed" system]. *Merzlotnye issledovaniya = Permafrost Research*, 1978, iss. 17. Moscow, Moscow University Publ., pp. 197–206. (in Russian)
6. Komarov I. A. *Termodinamika i tepломассообмен в disperсных мерзлых породах* [Thermodynamics and heat and mass transfer in dispersed frozen rocks]. Moscow, Sci. World Publ., 2003, 608 p. (in Russian)
7. Kudryavtsev S. A. *Chislennoe modelirovanie processa promerzaniya, moroznogo pucheniya i otaivaniya gruntov* [Numerical modeling of the process of freezing, frost heaving and thawing of soils]. Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov = Bases, foundations and soil mechanics, 2004, no. 5, pp. 21–26. (in Russian)
8. Orlov V. O., Dubnov Y. D., Merenkov N. D. *Moroznoe puchenie promerzayushchih gruntov i ego vliyanie na fundamentiya sooruzhe* [Frost heaving of freezing soils and its influence on the foundations of structures]. Leningrad, 1977, 183 p. (in Russian)
9. Permyakov P. P. *Identifikaciya parametrov matematicheskoy modeli teplovlagoperenosa v merzlyh gruntah* [Identification of the parameters of the mathematical model of heat and moisture transfer in frozen soils]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989, 84 p. (in Russian)
10. Cheverev V. G. *Priroda kriogennyh svojstv gruntov* [Nature of cryogenic properties of soils]. Moscow, Sci. World Publ., 2004, 234 p. (in Russian)
11. Brovka G. P., Agutin K. A., Murashko A. A. *Matematicheskie modeli i metody eksperimental'nogo issledovaniya processov teplomas-soperenosa i pucheniya pri promerzaniyu gruntov* [Mathematical models and methods of the experimental study of the processes of heat-mass transfer and swelling at ground freezing]. *Inzhenernaya geologiya = Engineering geology*, 2021, vol. XVI, no. 4, pp. 62–71. (in Russian)
12. Brovka G. P. *Teplo- i massoperenos v prirodnyh dispersnyh sistemah pri promerzaniyu* [Heat and mass transfer in natural disperse systems at freezing]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1991, 189 p. (in Russian)
13. Brovka G. P. *Vzaimosvyazannye processy teplo- i massoperenosa v prirodnyh dispersnyh sredah* [Interconnected processes of heat and mass transfer in natural disperse media]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2011, 362 p. (in Russian)
14. Brovka G. P., Dedyulya I. V., Agutin K. A. *Metodologicheskie voprosy issledovaniya i prognozirovaniya moroznogo pucheniya gruntov* [Methodological issues of research and forecasting of frost heaving of soils]. Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii "Inzhenerno-geologicheskie zadachi sovremennosti i metody ikh resheniya". Moskva, 13–14 aprelya 2017 g. [Proc. of the sci. and pract. conf. "Engineering and geological problems of our time and methods of their solution"]. Moscow, April 13–14, 2017. Moscow, 2017, pp. 178–185. (in Russian)

Информация об авторах

Агутин Кирилл Алексеевич – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kirill.agutin@gmail.com

Бровка Геннадий Петрович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: brovka_gp@tut.by

Дедюля Иван Владимирович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: dedyulyaivan@yandex.by

Information about the authors

Kirill A. Agutin – Researcher, Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus, (10, F. Skoryna Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kirill.agutin@gmail.com

Gennady P. Brovka – D. Sc. (Technical), Professor, Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, (10, F. Skoryna Str., Minsk, 220076, Minsk, Belarus). E-mail: brovka_gp@tut.by

Ivan V. Dedyulya – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoryna Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: dedyulyaivan@yandex.by